

大面积覆铜多层印制板通孔焊接温度场仿真

李春节 郎岩 王丽娜

(北京航天光华电子技术有限公司, 北京 100854)

文 摘 为了提高型号产品中连接大面积覆铜的通孔元器件焊点的过锡率,进而提高焊点的可靠性,本文建立了四层大面积覆铜通孔焊焊接三维模型,研究添加温度补偿后的四层覆铜的印制板通孔焊接过程中的温度场分布,得出焊接温度对过锡率的影响规律。发现焊接温度350℃时通孔过锡量达到100%,这与实际焊接所有焊点过锡量均达到100%的结果一致。有限元温度仿真结果与热电偶测温结果吻合较好,表明该模型可以准确地模拟焊接过程中温度演化,可为大面积覆铜通孔焊点的手工焊接过程和焊接参数优化提供理论指导。

关键词 大面积覆铜,通孔元器件,温度场仿真,透锡

中图分类号:V461

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.005

Temperature Field Simulation in Through Hole Soldering of Large-area Copper Overlaid in Multilayer PCB

LI Chunjie LANG Yan WANG Lina

(Beijing Aerospace Guanghua Electronic Technology Co., LTD, Beijing 100854)

Abstract In order to increase the hole filling of large-area copper overlaid in multilayer PCB in model products, in this study, a three-dimensional model of four-layer large-area copper-clad through-hole soldering was established. By studying the temperature field distribution during the through-hole soldering process of a four-layer copper-clad printed board after added temperature compensation, the influence of soldering temperature on the solder penetration was concluded. It was found that the through-hole solder penetration reached 100% at the soldering temperature of 350℃, which is consistent with the actual soldering result that all solder joints reached 100% solder penetration. The finite element temperature simulation results are in good agreement with the thermocouple temperature measurement results, indicating that the model can accurately simulate the temperature evolution during the soldering process, and provides theoretical guidance for the manual soldering process and soldering parameter optimization of large-area copper-clad through-hole solder joints. It has very important research significance for ensuring the solder penetration rate of the through-hole solder joints, and then ensuring the production quality of the products.

Key words Large area of copper layer, Through hole components, Temperature field simulation, Solder penetration

0 引言

通孔插装式元器件因其良好的机械连接性能、抗振性能和设计选型需要,仍然在混合安装电路中占有一定的选用比例。甚至在航天、军工等成熟型号产品中,通孔插装元器件仍占据主导地位。随着组装技术的发展,在通孔插装器件封装不变的情况下,印制板的互联密度、层数、覆铜面积却日益提升,这给原先稳定的焊接方法和工艺参数带来了新的挑战^[1-2]。

为了使电子产品呈现更好的稳定性和可靠性,同时将电磁干扰降低,目前的多层印制板均采用了

大面积覆铜的设计。但是这种大面积覆铜的特殊性,也带来了焊接质量问题,即在完成表面安装元器件再流焊接之后,必须使用电烙铁完成后续通孔元器件的焊接。以传统的通孔元器件焊接工艺过程为例:首先对元器件进行搪锡、成形(某些封装不涉及)等预处理,然后将其手工插在印制板对应位置上,通过相关工装进行抬高及固定,下一步即采用电烙铁接触焊接部位,按照标准规定的温度及时间完成焊接。对于结构设计简单的印制板,焊接后的润湿角、过锡量不会存在问题,但是对于多层数、覆铜面

收稿日期:2021-08-23

第一作者简介:李春节,1996年出生,工学硕士,助理工程师,主要从事电子装联工艺工作。E-mail:cjky9601@126.com

通信作者:郎岩,1986年出生,高级工程师,主要从事电子装联工艺工作。E-mail:649337660@qq.com

积大的印制板,传统的焊接方法必定出现新的问题:即铜的热导率很大,热量散失快,在没有及时温度补偿的情况下,焊锡在通孔中达不到熔融流动的温度,导致焊锡遇凝固于通孔中,最终形成了通孔焊接中最常见、最普遍的缺陷:通孔元器件焊接过锡不良,这也是航天各家单位共有的工艺技术难点^[3-5]。过锡不良缺陷常常表现为过锡量为50%~80%,无法满足QJ165B—2014中“焊接时,焊料只能从印制电路板的焊接面通过金属化孔流向元件面,焊料应100%润湿金属化孔,并覆盖焊接面的整个焊盘”的要求;同时,在解决过锡率的焊点返修过程中,不断提升的温度和时间也会造成焊盘结合力下降,影响产品的质量稳定性^[6-7]。

而补偿温度的意义是给予印制板足够的热量补充,避免焊接时大面积覆铜层分流热量而造成印制板通孔中温度的急剧下降^[8]。所以为了解决当前型号产品中通孔元器件焊接过锡不良的问题,满足产品的焊接可靠性要求,开展添加温度补偿的四层大面积覆铜区的通孔元器件焊接的热分布仿真工艺技术研究,为大面积覆铜通孔焊点的手工焊接过程和焊接参数优化提供理论支撑。通过模拟温度场分布对实际焊接过程形成可视化评价,这对型号产品的顺利研制及发射,具有十分重要的研究意义。

本文使用Creo软件根据实际尺寸1:1建立四层大面积覆铜通孔焊焊接三维模型,并使用有限元分析软件Ansys Workbench 2015版本对此模型进行三维热学分析。模拟不同焊接温度下的温度场分布,再通过热电偶测温,监测焊接过程中的温度变化,验证模型的有效性。

1 材料属性及三维有限元仿真模型

各部分材料及参数如表1所示^[9-10]。

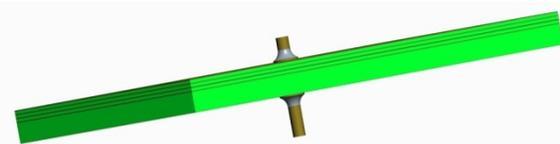
表1 模型材料定义
Tab 1 Definition of model materials

模型名称	材料	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{k})^{-1}$	$C/J\cdot(\text{kg}\cdot\text{C})^{-1}$
印制板	FR-4	1700	5.8	950
焊盘	铜	8930	398	385
焊点	锡铅焊料63/37	7500	60	220

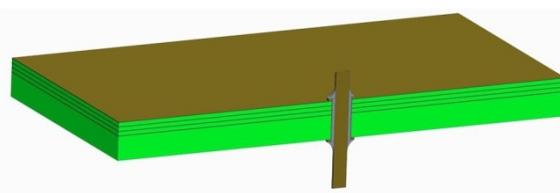
在满足航天行业标准“对于一般电子元器件的焊接,烙铁头温度宜为280℃,在任何情况下不应超过330℃”以及“对于特殊场合,允许烙铁头温度为360℃”条件下,选择310℃(常规值)、330℃(上限值)、350℃(特殊场合)进行对比焊接试验^[10]。通过添加温度补偿来研究不同焊接温度下的焊接过锡问题。此处,兼顾考虑航天行业标准和普通低T_g(约130℃)印制板的温度承载能力,补偿温度选择为130℃。兼顾考虑大面积覆铜焊接所需要的足够时

间的热量输入和满足标准要求的前提下,选取焊接时间为3s。

印制板层数为14层,印制板尺寸为180mm×170mm×2mm,通孔焊盘直径为1.06mm,覆铜层数为4层,为完全覆铜形式,铜层位置在1、3、5、7层,铜箔厚度一致,均为35μm左右。连接形式为直接连接,使用Creo软件按实际尺寸1:1建立四层大面积覆铜通孔焊焊接三维模型,如图1所示。



(a) 通孔焊焊接三维模型



(b) 模型z方向剖视图

图1 四层大面积覆铜通孔焊焊接三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of four-layer large-area copper-clad through-hole soldering

采用ANSYS Workbench 2015版本进行数值模拟分析,采用瞬态热分析模式,系统默认选取的单元为三维10节点Solid87,采用四面体网格划分方式,整个模型不同区域采用大小不同的网格划分,焊接区域划分最为细密,远离焊接区域的网格尺寸逐渐增大,提高计算精度和计算效率,结果如图2所示。

补偿温度的手段基本是采用平板预热台来实现。其温度补偿的形式是先对预热台设置一个温度,然后将印制板组装件放置于预热台之上,待预热一定时间后,印制板组装件达到相对热平衡,温度相对稳定的保持在一个较小波动的范围值内,从而使焊接的初始温度处于一个高点。根据测温试验,得出了预热台设置温度为200℃,预热10min时,印制板组装件靠近预热台面的实测温度为130℃。所以先对模型底面施加温度补偿,设定模型底面10min后温度达到130℃,然后分别施加焊接温度为310、330、350℃的热学边界设置,焊接时间为3s。设定室温环境温度22℃,工件与空气接触部分均为自由对流,对流换热系数为 $1.2\times 10^{-3}\text{J}/(\text{mm}^2\cdot\text{C})$ ^[9]。

在上述步骤完成后,进入到求解环节。通过后处理对求解结果进行计算,得到温度场分布云图,为了能

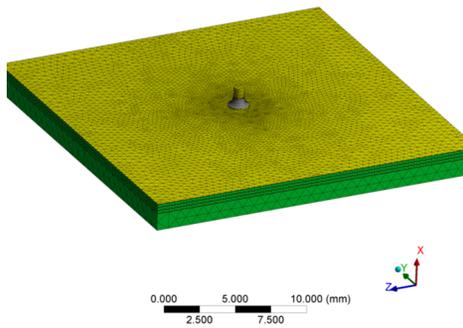


图2 网格划分结果

Fig. 2 Meshing result

精确看到温度的变化趋势,进一步提取温度场数据进行曲线的绘制,并针对数据进行分析从而得出结论。

2 模拟结果及分析

图3为预热10 min后的印制板温度分布,印制板组装件靠近预热台面的热平衡温度稳定在125~130.19℃,远离预热台面的温度稳定在90~110℃。焊盘连接的大面积覆铜,热量被“分流”出一部分。

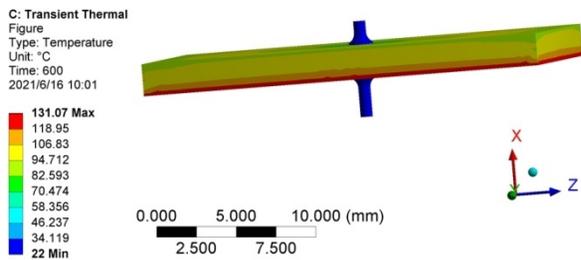
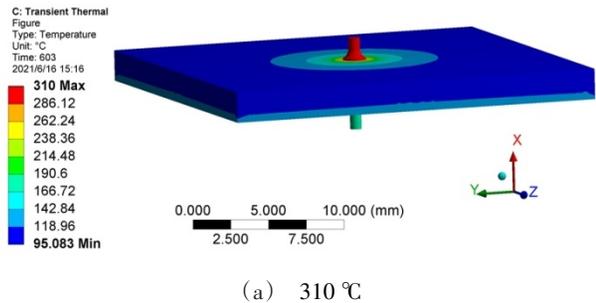


图3 预热10 min后的印制板温度分布云图

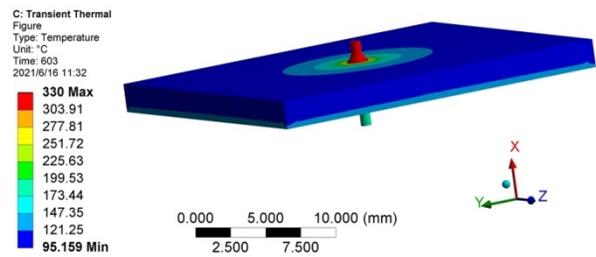
Fig. 3 The temperature distribution cloud map of the printed board after 10 min preheating

图4为焊接温度分别为310、330、350℃的模型温度分布整体结果云图。可以看出由于Cu较高的热导率,温度传递更快,靠近施加热源处焊料的铜引线侧迅速升温,焊接结束时温度接近焊接温度,而且铜层对焊接热量的吸收使得覆铜层整体的温度高温分布区域远大于印制板。印制板组装件上表面温度场分布基本呈圆形向外沿扩张,焊点温度最高,并且越靠近印制板边缘温度则越低。焊接温度越高,高温区域越大。随着焊接时间的增加,温度场分布越来越广泛。下表面由于施加的温度补偿,焊接过程中温度稳定在131~140℃。

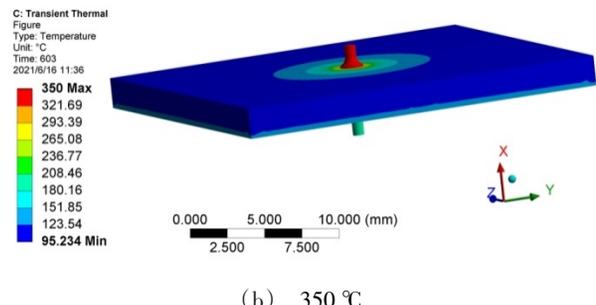
为了观察通孔焊接界面处的焊锡温度变化情况,不同时刻沿印制板组装件板长z方向的焊接界面的剖面温度分布如图5所示。温度场分布由上至下基本上表面中心呈椭圆形向下沿扩张,温度逐渐降低,温度变化率较大,降温较快。通孔处的温度最高,并且越靠近印制板边缘温度则越低。由于施加的温度补偿,剖面外围以下表面为中心呈一个反向抛物线状等温线。焊接温度为310℃时,焊接的终止面焊盘处温度介于



(a) 310℃



(b) 330℃



(b) 350℃

图4 不同焊接温度下的模型整体温度分布云图

Fig. 4 The temperature distribution cloud map of the model at different soldering temperatures

169.3~188.59℃;330℃时,焊接的终止面焊盘处温度介于177.68~191.21℃;350℃时,焊接的终止面焊盘处温度介于186.42~199.76℃,为了满足焊点的过锡要求,需保证焊接的终止面焊盘处温度至少达到183℃,在这个基础上,应尽量将温度控制在350℃以下,避免热冲击过大。

图6为焊接结束时的Sn63Pb37焊料的温度场分布。以Sn63Pb37焊料温度场分布云图高于183℃的温度区域长度与印制板与Sn63Pb37焊料界面高度的比值为模拟计算的过锡率。得到焊接温度分别为310、330、350℃的过锡率分别为(96±0.25)%、(97.5±0.25)%、100%。即仿真计算结果表明只有焊接温度为350℃时,四层完全覆铜印制板通孔焊点可完全过锡,310和330℃焊接温度时通孔下方部分位置未能过锡。

以350℃焊接温度为例,提取焊接结束时铜引线及焊料焊接处(路径1)、通孔处印制板与焊料焊接处(路径2)由上至下两条路径的温度场数据绘制温度变化曲

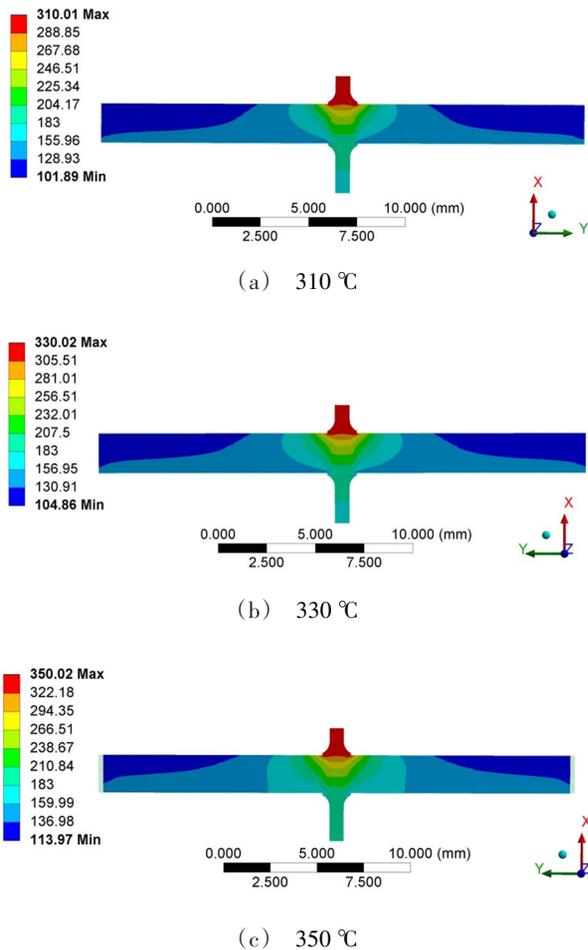


图5 不同焊接温度下的模型剖面温度分布云图

Fig. 5 The temperature distribution of the model profile at different soldering temperatures

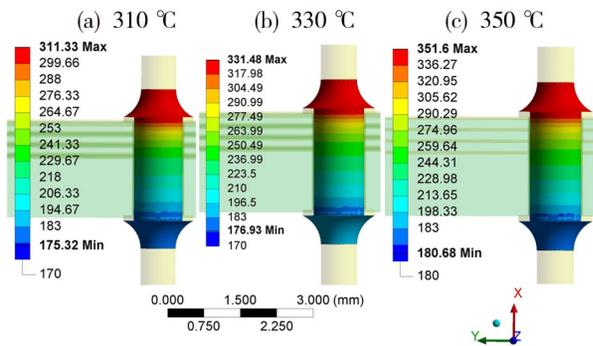


图6 不同焊接温度下的Sn63Pb37焊料温度分布云图

Fig. 6 The temperature distribution of the Sn63Pb37 at different soldering temperatures

线,如图7所示。通孔处随着距离的增大,温度逐渐降低,铜引线与焊料焊接处温度呈规则抛物线形状降低,印制板与焊料焊接处在覆铜处温度降低速率较大,表明大面积覆铜分流了部分热量。而印制板下方通孔处由于补偿热源的影响温度降低较慢,温度变化曲线逐渐与铜引线与焊料焊接处温度曲线重合。焊接结束时通孔底部的温度仍然高于Sn63Pb37焊料熔点183 °C,所以350 °C的焊接温度可完全过锡。

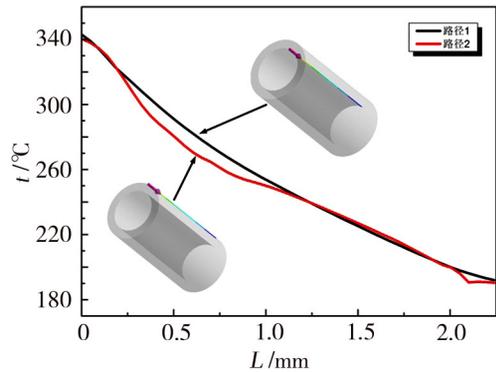


图7 焊料与印制板及铜引线连接处温度曲线

Fig. 7 Temperature curves at the junction of solder, printed board and copper lead

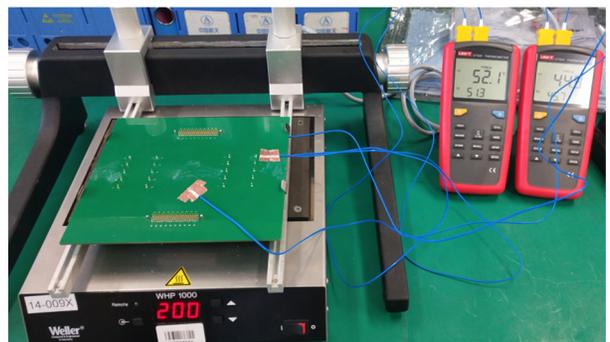


图8 设置预热台的热电偶测温过程

Fig. 8 Thermocouple temperature measurement process with preheating table setting

3 工艺试验

采用普通温控电烙铁+松香助焊剂的常规方法焊接连接四层大面积覆铜的焊点,电烙铁设置焊接温度分别为310、330、350 °C,预热补偿温度设置在200 °C时进行10 min 预热(通过调整预热时间,使印制板组装件靠近预热台面的温度接近于 (128 ± 2) °C 区间),在焊盘上引出的测温端粘接热电偶进行温度监测,验证数值模拟结果的准确性。

对焊接后的所有焊点进行X-Ray 检查,焊接温度为310 °C时的过锡量为90%~100%,一次焊接合格率为85%;焊接温度为330 °C时的过锡量为95%~100%,一次焊接合格率为90%;焊接温度为350 °C时的过锡量以及一次焊接合格率均达到了100%。焊接温度为350 °C时的部分X-Ray 检测结果和金相观察结果见图9所示,这与仿真结果计算过锡量一致,350 °C时的焊接效果最好,通孔处完全过锡。

对比热电偶测温采集的温度数据与仿真结果,温度采集位置分别为印制板上表面和下表面距铜引线中心5 mm处,同时提取仿真结果相应节点的温度数据,如图10所示。实验结果和模拟结果吻合度较高,上表面模拟和测量得到的最高温度分别为141.12和149.2 °C,下表面模拟和测量得到的最高温度分别为139.98和134.9 °C。模拟的最高温度略高于实际热电

偶测量温度,误差分别为5.42%和3.63%,表明该有限元模型能较好地反映实际焊接过程中的温度变化。预热及焊接过程中工件散热受到诸多不可控环境问题的影响,所以实际结果与模拟结果存在偏差。

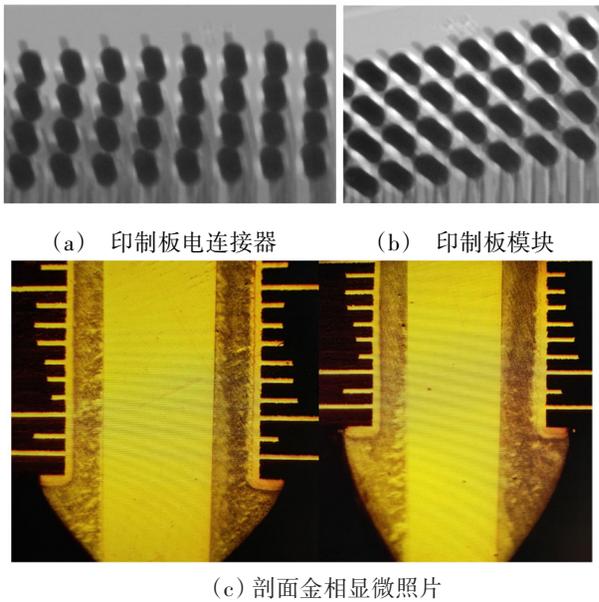


图9 X-Ray检测结果和金相观察结果

Fig. 9 X-ray results on the printed board and metallographic results

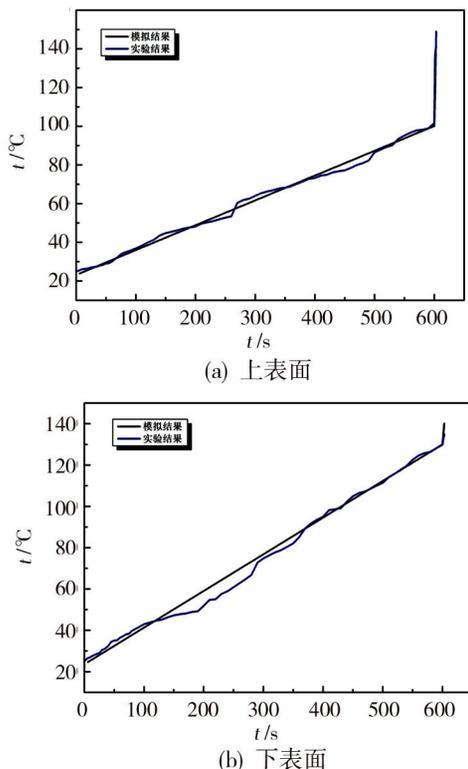


图10 热电偶测温 and 温度场模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of thermocouple temperature measurement and temperature field simulation results

4 结论

(1)随焊接温度的升高,印制板通孔过锡率增大。仿真结果与试验结果过锡量一致,350℃时的焊

接效果最好,通孔处完全过锡。

(2)覆铜层热量散失明显,而施加的温度补偿提高了焊接终止面的焊盘温度,焊盘处温度至少达到183℃可满足焊点的过锡要求。

(3)有限元温度模拟结果与热电偶测温结果吻合较好,验证了模型模拟结果的准确性。

参考文献

[1] 孙德松. 通孔波峰焊过锡不良问题研究[J]. 电子工艺技术, 2012,33(5):292-296.
 SUN Desong. Study on poor through hole fill in wave solder process[J]. Electronics Process Technology, 2012,33(5):292-296.
 [2] 杨晶,徐伟玲,李佳宾. 多层PCB大面积敷铜通孔焊点过锡工艺研究[J]. 航天制造技术,2012(3):11-13.
 YANG Jing, XU Weiling, LI Jiabin. Study of hole filling performance of large-area copper overlaid in multilayer PCB[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(3):11-13.
 [3] 王海超,施海健,丁颖洁等. 基于数值模拟的印制电路板低透锡率焊盘焊接温度分析[J]. 宇航材料工艺,2020,50(4):30-34.
 WANG Haichao, SHI Haijian, DING Yingjie, et al. Temperature analysis of low tin-permeability-rate pads of printed circuit board based on numerical simulation [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020,50(4):30-34.
 [4] 李佳宾,白邈,杨京伟,等. 通孔器件引脚与过孔间距对焊点透锡的影响分析[J]. 航天制造技术, 2016(5):41-43.
 LI Jiabin, BAI Miao, Yang Jingwei, et al. Analysis of the influence of the distance between the plated through-hole and the pin to the solder penetration [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(5):41-43.
 [5] 朱琦,刘娜,肖慧,等. 热循环条件下通孔插装焊点失效分析[J]. 焊接, 2012(12):38-42,75.
 ZHU Qi, LIU Na, XIAO Hui, et al. Failure analysis of through hole insertion solder joints under thermal cycle conditions [J]. Welding & Joining, 2012(12):38-42,75.
 [6] 闫秋菊. 通孔器件手工焊接温度问题的探讨[J]. 铁道机车与动车, 2016(9):33-36.
 YAN Qiuju. Discussion on manual soldering temperature of through hole devices[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2016(9):33-36.
 [7] AZIZ M, ABDULLAH M Z, KHOR C Y. Effects of solder temperature on pin through-hole during wave soldering: thermal-fluid structure interaction analysis[J]. The Scientific World Journal, 2014(2):1-13.
 [8] 赵桂花. 电子装联中透锡率提高途径探索[J]. 无线互联科技, 2015(23):65-66.
 ZHAO Guihua. Exploration of increasing tin penetration in electronic assembly[J]. Wireless Internet Technology, 2015(23):65-66.
 [9] 黄丙元. SMT再流焊温度场的建模与仿真[D]. 天津:天津大学, 2005.
 HUANG Bingyuan. Modeling and simulation of temperature field in SMT reflow welding[D]. Tianjin: Tianjin university, 2005.
 [10] ZULKIFLI M N, et al. Temperature cycling analysis for ball grid array package using finite element analysis [J]. Microelectronics International, 2011,28(1):17-28.